

PATENT  
32860-000261/US

IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE

Applicants: Günter RIES  
Application No.: NEW  
Filed: December 27, 2001  
For: FLUX PUMP HAVING A HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTOR  
AND A SUPERCONDUCTING ELECTROMAGNET WHICH CAN BE  
OPERATED BY WAY OF THE FLUX PUMP



**PRIORITY LETTER**

December 27, 2001

Honorable Commissioner of Patents and Trademarks  
Washington, DC 20231

Dear Sirs:

Pursuant to the provisions of 35 U.S.C. 119, enclosed is/are a certified copy of the following priority document(s).

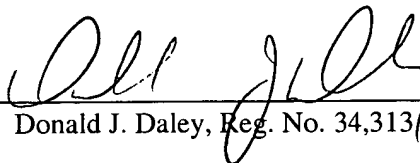
<u>Application No.</u>	<u>Date Filed</u>	<u>Country</u>
100 65 420.7	12/27/00	GERMANY

In support of Applicant's priority claim, please enter this document into the file.

Respectfully submitted,

HARNESS, DICKEY, & PIERCE, P.L.C.

By

  
Donald J. Daley, Reg. No. 34,313

P.O. Box 8910  
Reston, Virginia 20195  
(703) 390-3030



## Prioritätsbescheinigung über die Einreichung einer Patentanmeldung

**CERTIFIED COPY OF  
PRIORITY DOCUMENT**

**Aktenzeichen:** 100 65 420.7

**Anmeldetag:** 27. Dezember 2000

**Anmelder/Inhaber:** Siemens Aktiengesellschaft, München/DE

**Bezeichnung:** Flusspumpe mit Hochtemperatursupraleiter und damit zu betreibender supraleitender Elektromagnet

**IPC:** H 01 F 6/00

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 8. März 2001  
Deutsches Patent- und Markenamt  
Der Präsident  
Im Auftrag

Wassmayer

## Beschreibung

Flusspumpe mit Hochtemperatursupraleiter und damit zu betreibender supraleitender Elektromagnet

5

Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf eine Flusspumpe des Gleichrichter-Typs mit  $HT_c$  (Hochtemperatur) supraleitenden Schaltern und einen mit dieser Flusspumpe zu betreibenden  $HT_c$ -supraleitenden Elektromagneten.

10

Zum Beispiel für die Kernspin-Tomographie sind hohe Magnetfelder mit dazu auch hoher zeitlicher Konstanz der jeweiligen Magnetfeldstärke erforderlich. Hierfür sind Elektromagnete mit supraleitenden Spulen entwickelt worden. Schon seit Jahrzehnten sind solche Spulen bekannt, die aus Tieftemperatur- ( $LT_c$ -) Supraleitermaterial wie Niob-Zinn oder Niob-Titan bestehen. Zu betreiben sind solche Magnete im Temperaturbereich von etwa 4 K Temperatur.

15

Seit etwa einem Jahrzehnt sind auch supraleitende Materialien des Hochtemperatur-Typs ( $HT_c$ -Supraleiter) bekannt, die bis über Temperaturen der flüssigen Luft, d.h. bei Temperaturen kleiner als  $77^\circ\text{K}$  supraleitend sind. Es sind auch bereits Elektromagnete mit  $HT_c$ -supraleitender Spule hergestellt worden, die für hohe Magnetfelder z.B. bis zu Temperaturen kleiner etwa 40 K verwendbar sind. Diese niedrigere Betriebstemperatur beruht darauf, dass die  $HT_c$ -Stromtragfähigkeit dafür verwendeter  $HT_c$ -Supraleiter-Materialien, z.B. Wismutcuprate

25

wie  $(\text{Bi, Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$  und  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$  und Seltenerdcuprate  $\text{RE Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  mit  $\text{RE} = \text{Nd, Gd, Sm, Er, Y}$ , nur bis zu einer von der Höhe des herrschenden Magnetfeldes abhängig begrenzten jeweiligen Betriebstemperatur ausreichend ist.

30

Ein einmal in einer solchen supraleitenden Spule eines Magneten erzeugter und fließender Kurzschluss-Supraleitungsstrom hält im Idealfall andauernd an. Um einen solchen supraleitenden Strom in eine Supraleiterspule einzuspeisen, wird z.B.

35

eine als Flusspumpe bekannte Einrichtung verwendet. Eine solche Flusspumpe ist z.B. bekannt aus „Study of Full-Wave Superconducting Rectifier-Type Flux-Pumps“, in IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 32 (1996) pp. 2699-2702 und aus „On Fully  
5 Superconducting Rectifiers and Flux Pumps“, Cryogenics, Mai 1991, Seiten 262-275.

Der genannte Stand der Technik bezieht sich ausschließlich auf Supraleiter des Tieftemperatur ( $LT_c$ -)Typs, d.h. auf Materialien, wie z.B. des genannten Niob-Zinns und Niob-Titans. In Figur 1 eines Beispiels einer Flusspumpe 2 des Gleichrichtertyps des Standes der Technik (aus IEEE Transactions ... wie oben) ist mit 11 die supraleitende Spule mit  $LT_c$ -Supraleiter eines Elektromagneten 111 bezeichnet, wie er z.B. für  
15 die schon erwähnte Kernspin-Tomographie bekanntermaßen verwendet wird. Mit 12 ist eine Stromquelle bezeichnet, die die elektrische Energie liefert, mit der der Aufbau des in der Spule 11 im Betrieb des Elektromagneten fließenden Supraleitungsstroms bewirkt wird. Mit 13 ist ein Transformator mit  
20 einer Primärspule 113 und bei diesem Beispiel mit 2 in Reihe geschalteten Sekundärspulen 213 und 313 bezeichnet. Mit 15 und 16 sind zwei Schalter für das Schließen und Unterbrechen des im Stromkreis der jeweiligen Sekundärspule 213 bzw. 313 fließenden supraleitenden Stromes bezeichnet. Diese beiden  
25 Sekundärspulen und Schalter bestehen im Stand der Technik aus  $LT_c$ - und in der noch zu beschreibenden Erfindung jedoch aus  $HT_c$ -supraleitendem Material. Um als Transformator 13 wirken zu können, liefert die Stromquelle 12 generell bezeichnet einen Wechselstrom, d.h. einen Strom mit wiederkehrend aufeinanderfolgend entgegengesetzter Stromrichtung. Entsprechend  
30 dem Takt dieser Stromrichtungswechsel werden die Schalter 15 und 16, und zwar jeweils einander entgegengesetzt, geöffnet und geschlossen. Es erfolgt damit eine Gleichrichtung des durch die mit 20 und 21 bezeichneten Leitungen fließenden elektrischen Stromes. Dieser Strom ist der Speisestrom für  
35 die Spule 11 des Elektromagneten. Mit 23 ist eine bekannte, hier nicht näher ausgeführte, Sicherungseinrichtung zum

Schutz der Flusspumpe 2 bezeichnet. Mit 25 ist ein Steuersystem für die Steuerung des Taktes der Wechsel des Speisestromes der Stromquelle 12 und der Schalter 15 und 16 bezeichnet.

- 5 In der bekannten Flusspumpe der Figur 1 sind die Schalter 15 und 16 Tieftemperatur-(LT<sub>c</sub>-)Supraleiterschalter. Deren Zustände „Offen“, und „Geschlossen“, sind durch die Zustände des in ihnen enthaltenen Leitermaterials „supraleitend“, oder „normalleitend“, gegeben. Der supraleitende Zustand liegt bei  
10 entsprechend tief abgekühltem Zustand vor. Durch Erwärmen des jeweiligen Schalterelements wird dieses in den normalleitenden Zustand, der einem geöffneten Schalter entspricht, umgewandelt. Diese Umwandlung ist reversibel.
- 15 In wie bekannter Weise durch periodisches Umschalten der Schalter 15 und 16 kann die Spule 11 des Elektromagneten bzw. deren Stromkreis mit supraleitendem Strom sukzessive aufgeladen wird, so dass entsprechend sukzessive in der Spule 11 des Elektromagneten ein korrespondierendes Elektromagnet-Gleich-  
20 feld hoher Magnetfeldstärke bzw. hohen Magnetflusses erzeugt wird, das bei aufrechterhaltener Supraleitung permanent ist. In weitem Maße gilt diese Permanenz für die LT<sub>c</sub>-Supraleitung und die dafür verwendeten, schon oben angegebenen Materialien. Zum Beispiel ein einmal aufgeladener Supraleiter-Elektromagnet beispielsweise eines Kernspin-Tomographen hält sei-  
25 ne Magnetfeldstärke über lange Zeit so konstant, dass mit diesem Magnetfeld die extrem hohen Anforderungen an Konstanz des Feldes für Kernspin-Tomographie eingehalten werden. Ein  
Nachladen ist z.B. erst nach etwa 100 Stunden erforderlich, vorausgesetzt dass keine technischen Mängel oder betriebsmäßige Fehler vorliegen.  
30

Die Grundprinzipien dieser bekannten Flusspumpen haben nur zu einem gewissen Maße für die bei der Erfindung vorgesehene  
35 Verwendung von Hochtemperatur-HT<sub>c</sub>-Supraleitungsmaterialien Gültigkeit. Es sind für erfindungsgemäße Projekte und Vor-

richtungen mit solchen Materialien vielfach besondere oder andersartige Bedingungen und Umstände zu berücksichtigen.

5 Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, für eine erfindungsgemäße Flusspumpe bzw. für die erfindungsgemäße Kombination einer solchen Flusspumpe und eines Supraleiter-Elektromagneten für hochkonstantes Magnetfeld die Maßnahmen anzugeben, mit denen die entsprechenden Vorrichtungen mit HTc-Supraleiter-Material in vorteilhafterweise realisiert werden können.

10 Insbesondere zur zusätzlichen Erläuterung zu der nachfolgenden Beschreibung der Erfindung dienen auch die nachfolgend erörterten Figuren, die auch Offenbarungsinhalt zur Erfindung enthalten.

20 Figur 1 zeigt ein Prinzipbild eines bekannten Schaltungsaufbaues, wie er auch bei der vorliegenden Erfindung in Betracht kommt.

Figur 2 zeigt eine Variante zur Gleichrichterschaltung der Figur 1.

25 Figur 3 zeigt in Ansicht und als Schnitt I-I' einen prinzipiellen Aufbau einer erfindungsgemäßen Kombination von Flusspumpe und Elektromagnet in einem gemeinsamen Kryostaten.

30 Figur 4 zeigt eine Ausführungsform für einen erfindungsgemäßen Schalter der Gleichrichterschaltung einer erfindungsgemäßen Flusspumpe.

Figur 5 zeigt ein Betriebsdiagramm.

35 In der Figur 1 ist für die Flusspumpe 2 eine auch als Zweiweg-Gleichrichtung mit zwei Sekundärspulen bezeichnete Schaltung gezeigt. An deren Stelle kann für die Erfindung auch eine ebenfalls als gleichrichtend wirkende Brückenschaltung

verwendet werden, wie sie aus der Elektrotechnik, dort mit Dioden, generell bekannt ist und hier als eine vorgesehene Ausführung für die Erfindung in Figur 2 gezeigt ist. Mit der Figur 1 wenigstens im wesentlichen übereinstimmende Einzelheiten dieser Brückenschaltung der Figur 2 haben dieselben, bereits definierten Bezeichnungen. Mit 115 und 116 sind die zwei zusätzlichen Schalter der insgesamt vier Schalter umfassenden Brückenschaltung bezeichnet. Bei dieser Schaltung bedarf es nur einer Sekundärspule 213 des Transformators 13.

Eine vorteilhafte Maßnahme der Erfindung ist, wenigstens die supraleitende Spule 11 des Elektromagneten und seine zugehörige Flusspumpe im Vakuumraum eines und desselben Kryostaten 100 anzuordnen. Vorteil dieser Maßnahme ist, dass damit nur eine Kälte-Versorgungseinrichtung und nur ein Kryostatgefäß erforderlich sind.

Für die die oben angegebene Aufgabe lösende vorliegende Erfindung gemäß Patentanspruch 1 und deren Weiterbildung gemäß den Unteransprüchen ist z.B. eine zu berücksichtigende besondere Bedingung diejenige, dass die erfindungsgemäße Vorrichtung mit supraleitender Flusspumpe und supraleitendem Elektromagneten, erfindungsgemäß mit HT<sub>C</sub>-Supraleiter-Material für vorteilhafterweise höhere Betriebstemperaturen ausgerüstet ist und dazu derart ausgeführt sein muss, dass mit der Flusspumpe ein Nachladen des Elektromagneten im Abstand von jeweils wenigen Sekunden ausgeführt werden kann. Dies ist erforderlich, weil für eine erfindungsgemäße Vorrichtung mit

HT<sub>C</sub>-Supraleiter-Material die geforderte Konstanz der Magnetfeldstärke des Magneten innerhalb der vorgegebenen Toleranzgrenze nur mit derart kurzfristig aufeinander folgendem Nachladen einzuhalten ist. Dies beruht im wesentlichen auf dem Austausch des bekanntermaßen verwendeten LT<sub>C</sub>-Supraleiter-Materials gegen das erfindungsgemäß verwendete HT<sub>C</sub>-Supraleiter-Material. Auch ist zu berücksichtigen, dass bei einer erfindungsgemäßen Vorrichtung mit HT<sub>C</sub>-Supraleiter-Material die Flusspumpe und der Magnet bei vorteilhafterweise höherer

Temperatur, beide aber bei verschiedenen Temperaturen zu betreiben sind, die Flusspumpe z.B. nahe unterhalb 77 K und der Elektromagnet im Bereich von etwa 20 bis 40 K.

- 5 Für die erfindungsgemäße Lehre ist vorgesehen, für die eine oder mehreren Sekundärwicklungen des Transformators  $HT_c$ -supraleitende Leiter, auf der Basis von  $Bi2212$ -,  $Bi2223$ -Bandleitern, diese in Silbermatrix ausgeführt, und/oder  $YBa-CuO$ -Leiter auf metallischem Trägerband als bevorzugte Beispiele vorzusehen. Es können auch andere  $HT_c$ -Supraleiter-Materialien und auch solche als Draht verwendet werden. Für die Primärwicklung des Transformators kann ebenfalls  $HT_c$ -Supraleitermaterial verwendet werden, es genügt aber für diese Spule auch Kupferdraht, der bei tiefen Temperaturen, z.B.
- 10 bei 77 K, sogar sehr hohe spezifische Leitfähigkeit hat, jedoch nachteiligerweise Joul'sche Verlustwärme erbringt. Als Windungsverhältnis von Primärspule zu jeweiliger Sekundärspule ist ein Verhältnis sehr viel größer als 1, vorzugsweise größer etwa 100 bis 1000, zu wählen. Der vorzugsweise zu verwendende Transformator Kern besteht insbesondere aus geblechtem Eisen, einem anderen weichmagnetischen Material oder ist ein Ferrit. Es kann auch ein Trafo mit lediglich Luftspulen verwendet werden.
- 20
- 25 Die Figur 3 zeigt in einem gemeinsamen Kryostaten 100 eine erfindungsgemäße Anordnung, bestehend im wesentlichen aus der supraleitenden Spule 11 des Elektromagneten 111 und der Flusspumpe 2 mit der Schalteranordnung 15, 16 und dem Transformator 13 mit der Primärspule 113 und den Sekundärspulen
- 30 213 und 313. Die Primärspule und die Sekundärspulen sind ineinandergewickelt dargestellt. Das Bezugszeichen 12 weist auf die Speise-Stromquelle hin. Mit 413 ist eine Sondenspule bezeichnet, mit der der Magnetfluss im hier vorgesehenen Kern des Transformators 13 überwacht werden kann.

35

Ein Ausführungsbeispiel für einen bei der Erfindung verwendeten Schalter zeigt die Figur 4. Für einen Schalter 15, 16,



115, 116 ist HT<sub>c</sub>-Supraleiter-Material, und zwar dieses als vorzugsweise 0,2 bis 2 µm dicker Dünnfilm 41 mit hoher Stromtragfähigkeit von mindestens 10<sup>6</sup>, vorzugsweise größer 10<sup>7</sup> A/cm<sup>2</sup>, vorgesehen. Vorzugsweise geeignete HT<sub>c</sub>-Materialien sind REBaCuO mit RE = einem Seltenerdmetall Nd, La, Dd, Eu, Sm etc. oder Yttrium. Ebenso geeignet sind auch Bi2212-, Bi2223- oder LaSr-CuO. Der Dünnfilm 41 ist vorzugsweise bei polykristallinem Substrat auf einer elektrisch isolierenden, kristallin ausgerichteten Pufferschicht 42' aufgebracht. Diese Pufferschicht 42' kann z.B. nach dem bekannten IBAD-Verfahren (Jijima, Appl. Phys. Lett. 60 (1990) S. 769) abgeschieden sein. Diese Pufferschicht dient insbesondere der biaxialen kristallinen Ausrichtung bzw. Texturierung des auf ihr abzuschcheidenden, oben genannten Dünnfilms 41. Der Dünnfilm 41 bzw. die Pufferschicht 42', auf der der Dünnfilm 41 abgeschieden wird, ist auf einem z.B. 0,1 bis 0,05 mm dünnen, schlecht wärmeleitenden, elektrisch nicht leitenden Substrat 42 aufgebracht. Hierfür eignet sich polykristallines ZrO<sub>2</sub>, MgO, Glas usw. Bei einkristallinem Substrat, wie z.B. SrTiO<sub>3</sub>, MgO, kann die Pufferschicht auch weggelassen werden. Ergänzend kann auf dem Supraleiter-Dünnfilm 41 vorbeschriebener Art noch eine elektrisch-normalleitende Schutz- und/oder Shunt-Schicht 43 aus Au, Ag, Cu usw. aufgebracht sein. Mit 44 sind Anschlüsse bezeichnet, die in einem lateralen Abstand voneinander auf dem z.B. Dünnfilm 41 des HT<sub>c</sub>-Supraleiter-Materials, dieses niederohmig, z.B. durch Lotverbindung, kontaktierend, aufgebracht sind. Sie dienen zur Zuführung und Abführung des durch den Schalter, d.h. durch den Dünnfilm in lateraler Richtung zwischen diesen Anschlüssen 44 hindurchfließenden, zu schaltenden elektrischen Stroms.

Ein jeweiliger wie voranstehend beschriebener Aufbau ist für einen jeweiligen Schalter 15, 16, 115, 116, im wesentlichen in lateraler Richtung streifenförmig, ausgeführt. Ein jeweiliger Schalter entsprechender solcher streifenförmiger Aufbau 41 bis 44 befindet sich auf einer vorzugsweise für alle vorhandenen Schalter 15, 16, 115, 116 vorgesehenen gemein-

samen Grundplatte 45. Diese besteht aus einem gut wärmeleitenden Material wie z.B. Kupfer. Vorzugsweise ist aber zwischen diesem Schichtaufbau 41 bis 43 und dessen Auflagefläche der Grundplatte 45 noch eine Schicht oder ein Belag 46 auf der Grundplatte vorgesehen. Diese Schicht bzw. dieser Belag besteht aus einem hinsichtlich seines Wärmeleitvermögens ausgewähltem und in seiner Dicke bemessenen Material. Dieses Material kann z.B. vorzugsweise faserverstärkter Kunststoff (GFK) oder dgl., jedoch notwendigerweise tieftemperaturbeständiges, Material sein. Der Aufbau 41 bis 43 kann mittels Kleber oder mittels eines Fettes auf der Grundplatte 45, bzw. dem Belag 46, aufgebracht sein. In allen Fällen ist wichtig, dass ein ausgewählt definiert bemessener Wärmewiderstand zwischen der Grundplatte 45 und dem darüber liegenden Aufbau 41 bis 43 vorhanden ist, damit das Arbeiten des jeweiligen Schalters gewährleistet ist.

Die Grundplatte 45 wird im Betrieb auf niedriger Temperatur unterhalb der Sprungtemperatur  $T_c$  des für den Dünnfilm 41 vorgesehenen  $HT_c$ -Supraleiter-Materials gehalten. Damit wird erreicht, dass dieser  $HT_c$ -Dünnfilm 41 ohne weiteres Zutun im supraleitenden Zustand gehalten ist. In diesem Zustand fließt supraleitender Strom zwischen den Anschlüssen 44 durch den Dünnfilm 41, d.h. der betreffende Schalter 15 oder 16, 115, 116 ist „geschlossen“.

Dort wo physikalisch im Dünnfilm 41 des Schalters das Schalten, d.h. das Unterbrechen des andernfalls fließenden Stromes erfolgen soll, ist ein Heizer 48, z.B. in Form einer Folie aus einem für Heizer geeigneten Material, auf dem Dünnfilm 41 bzw. auf der ggf. über dieser befindlichen Shunt-Schicht 43 aufgebracht. Dieser Heizer 46 wird über seine Anschlussleitungen 47 mit Stromimpulsen gespeist, deren erzeugte Joule'sche Wärme das darunterliegende Supraleitermaterial des Schalters aus dem Zustand der Supraleitung in resistiven, widerstandsbehafteten Zustand bringt, nämlich wenigstens nahe

an oder über die Sprungtemperatur  $T_c$  für diejenige Zeitdauer aufheizt, innerhalb derer dieser Schalter geöffnet sein soll.

Die Figur 4 umfaßt noch ein Diagramm. In diesem ist die X-Achse die laterale Richtung in der Dünnschicht 41. Auf der Ordinate ist die Temperatur aufgetragen. Mit  $T_c$  ist die Sprungtemperatur des  $HT_c$ -Supraleiter-Materials der Dünnschicht 41 eingetragen. Die Betriebstemperatur der Grundplatte 45 liegt etwa auf der Höhe des Wertes  $T_0$ . Zum Beispiels ist dies die Betriebstemperatur der Magnetspule im Kryostaten. Die in der Figur 4 angegebene Kurve 141 zeigt wenigstens angenähert den Temperaturverlauf innerhalb des  $HT_c$ -

Supraleiter-Materials des Dünnsfilms 41, und zwar in der lateralen Richtung zwischen den beiden Anschlüssen 44 und im Zustand bzw. der Phase des geöffneten Schalters. Wie ersichtlich, ist in diesem Zustand die Temperatur im Dünnsfilm 41 im Bereich unterhalb des Heizers 48 auf Werte oberhalb der Sprungtemperatur  $T_c$  erhöht, und zwar durch Wärmezufuhr entgegen der Abkühlung durch die Grundplatte 45. Nach jeweiligem Wiederausschalten des durch den Heizer 46 hindurchfließenden, die Schalterstrecke 146 aufheizenden elektrischen Stromes kann sich die Schalterstrecke 146 wieder auf Temperaturen unterhalb der Sprungtemperatur  $T_c$  abkühlen. Es ist dabei zu berücksichtigen, dass in der Schalterstrecke 146 während der normalleitenden Phase des dort befindlichen supraleitenden Materials des Dünnsfilms in diesem Material Joule'sche Wärme eines durch den Schalter hindurchfließenden, dort normalleitenden Ohm'schen Stromes erzeugt wird. Diese ist dem Abkühl-effekt entgegenwirkend und muss dementsprechend quantitativ berücksichtigt werden.

Für die vorliegende Erfindung wird nachfolgend eine weitere Betriebsart hinsichtlich der Schalter angegeben.

Anstelle wie vorangehend beschrieben, den Heizer 46 während der geöffneten Phase des Schalters andauernd in Betrieb zu halten, ist als Weiterbildung der Erfindung eine alternative

Betriebsweise anwendbar. Diese besteht darin, den Heizer 46 nach Art eines Trigger-Vorgangs jeweils mit einem vergleichsweise zur Dauer der Schalterphase nur kurzzeitigen Stromimpuls zu beaufschlagen. Die mit einem solchen Stromimpuls im Heizer erzeugte Joule'sche Wärme ist so bemessen, dass diese die Schalterstrecke für entsprechend kurze Zeit auf Temperaturen oberhalb der Sprungtemperatur  $T_c$  aufheizt. Im Bereich der Schalterstrecke 146 des Dünnsfilms 41 herrscht jetzt zunächst kurzzeitig von außen extrem erzwungene Normalleitung des Materials mit einem Widerstand  $R$ , verbunden mit dem Auftreten von Joule'scher Wärme  $U^2/R$  ( $U$  = an dem Bereich 146 anliegende in den Sekundärspulen der Gleichrichterschaltung induzierte elektrische Spannung), nämlich bewirkt durch den dann weiterhin und abhängig von dieser Spannung noch zwischen den Anschlüssen 44 fließenden Ohm'schen Reststrom. Mit Bemessung der Wärmeableitung zwischen dem Dünnsfilm 41 und der Grundplatte 45 im Bereich des Schalters lässt sich ein Gleichgewicht zwischen Wärmeabfuhr in die Grundplatte und auftretender Joule'scher Wärme des Reststromes im in diesem Falle dann offenen bzw. unterbrochenen Schalters erreichen. Es stellt sich dann ein selbststabilisierter Zustand der Sperrung des ansonsten bei geschlossenem Schalter zwischen den Anschlüssen 44 und durch die Spule 11 hindurch fließenden elektrischen Stromes ein.

Dieser vorteilhaft selbststabilisierte Zustand der Funktion „geöffneter Schalter“ wird beendet durch wesentliches Absinken der Stromstärke des erwähnten Reststromes. Dieser Zustand tritt immer dann ein, wenn auf der Primärseite des Transformators 13 die Stromeinspeisung derart ist, dass in dem Transformator kern die zeitliche Änderung des magnetischen Flusses  $d\phi/dt$  für ein Zeitintervall  $\tau$  gegen Null geht, d.h. im Zeitintervall konstanter Stromamplitude des Primärstroms in dem Transformator. In diesem Zeitintervall geht auch die im Transformator und in der Gleichrichterschaltung induzierte Sekundärspannung am geöffneten Schalter auf den Wert Null. Dadurch wird der Reststrom und die von ihm in der Schalter-

strecke erzeugte Joule'sche Wärme so gering, dass jetzt die Wärmeabfuhr überwiegt, womit die Schalterstrecke unter die Sprungtemperatur abkühlt und die Selbststabilisierung abreißt. Die Schalterstrecke gelangt dadurch wieder in supra-

5 leitenden Zustand und der betreffende Schalter ist wieder geschlossen, nämlich bis ein nächster triggernder Heizimpuls gegeben wird. Bei dieser Ausführungsform der Erfindung ist somit außer der für einschlägige Flusspumpen notwendigen Synchronisation der primärseitigen Stromeinspeisung mit dem Takt

10 des Betriebs der Schalter der Gleichrichterschaltung außerdem noch die Form des primären Wechselstroms bzw. der Wechselstrom-Impulsanregung diesem speziellen Betrieb der Schalter anzupassen. Bezüglich dieser Anpassung sei noch auf die nach-

folgenden Ausführungen zur Figur 5 hingewiesen.

15 Es wird damit das Ziel erreicht, die gespeicherte Energie in und die Wärmeableitung aus der bei Temperaturen oberhalb der Sprungtemperatur widerstands-behafteten Schalterstrecke 146 möglichst klein zu halten bzw. klein zu bemessen, um die Ab-

20 kühlzeit vom widerstands-behafteten Zustand in den (wieder) supraleitenden Zustand zu minimieren. Dadurch kann die Flusspumpe im Zyklus mit hoher Zyklusfrequenz betrieben werden, und zwar dies ohne ein großes Maß solcher thermischer Energie in den kalten Arbeitsbereich des Kryostaten bei Ausführung

25 der wiederholten Schaltvorgänge einzubringen.

Mittels der Flusspumpe 2 wird der Elektromagnet 111 durch Stromzufuhr aus der Stromquelle 12 aufgeladen. Hierzu sei

30 auch auf die Figur 5 hingewiesen. Diese zeigt in ihren Zeilen A bis F die nachfolgend beschriebenen Vorgänge. Die Vorgänge der linken Hälfte der Figur 5 betreffen das vollständige Aufladen des Elektromagneten. Die dazu rechte Hälfte der Figur 5 bezieht sich auf die Vorgänge des Nachladens zur Kompensation zeitlich aufgetretener Verluste, d.h. die Vorgänge zur zeit-

35 lichen Stabilisierung des Magnetfeldes des Elektromagneten 111.

Die Zeile A der Figur 5 zeigt einen für eine Flusspumpe der Erfindung beispielhaften zeitlichen Verlauf des durch die Speisung des Transformators 13 in dessen Kern erzeugten Magnetfluss  $\phi$ . Auf der Abszisse ist die Zeit  $t$  aufgetragen. Eine zeitliche Änderung des Magnetflusses  $\phi$  bewirkt auf der Sekundärseite einen jeweiligen Spannungsimpuls gemäß der Zeile B an der jeweiligen Sekundärspule 213, 313. In dem Stromkreis der Sekundärspule, z.B. 213, mit leitend geschaltetem Schalter, z.B. Schalter 15, fließt dann ein Strom. Dieser führt zu einem Stromanstieg des Stromes in der Magnetspule 11 gemäß der Stufenkurve der Zeile C. Die in Zeile A darauffolgende zeitliche Flussänderung führt wieder zu einem Spannungsimpuls auf der Sekundärseite des Transformators, und zwar zu einem Impuls mit entgegengesetztem Vorzeichen, wie Zeile B zeigt. Entsprechend der Funktion der Gleichrichterschaltung mit nunmehr geschlossenem Schalter 16 fließt nun ein Strom durch die Sekundärspule 313 und dies führt, wie Zeile C zeigt, zu einer weiteren Aufladung des Stromflusses in der Magnetspule 11. Wie für Flusspumpen bekannt, wird dieser Vorgang bis zum endgültigen Aufladen der Magnetspule 11 auf die Stromstärke fortgesetzt, mit der diese Magnetspule 11 ihr vorgegebenes hohes Magnetfeld erreicht.

Im zeitlichen Ablauf der vorangehend dargelegten Vorgänge ist abwechselnd einmal der Schalter 15 des einen Zweiges und einmal der Schalter 16 des anderen Zweiges der Gleichrichterschalter für Stromdurchfluss geschlossen, d.h. in supraleitendem Zustand. Der z.B. bei Stromdurchfluss durch den Schalter 15 zeitgleich gesperrte Schalter 16 ist gemäß Zeile D bis auf oder über die Sprungtemperatur  $T_c$  des Materials des Dünnsfilms 41 erwärmt und damit, bis auf einen erwähnten Reststrom sperrend geschaltet.

Für die Ausführungsform der Erfindung ohne Nutzung des selbststabilisierenden Effekts wird der Heizer 46 für die gesamte Zeitdauer des jeweiligen Impulses der Zeile B, - einmal in dem einen Schalter 15 und einmal in dem anderen Schalter

16 - wie oben ausgeführt mit Heizstrom gespeist, um in dessen jeweiliger Schalterstrecke 146 im Dünnsfilm 41 eine die Sprungtemperatur  $T_c$  übersteigende Temperatur zu erreichen und für die Dauer des Öffnens des Schalters aufrechtzuerhalten.

5

Für die Ausführungsvariante der Erfindung mit selbststabilisiertem Effekt der Schalter zeigt die Zeile D' der Figur 5 die Folge der oben erwähnten Stromimpulse für das triggerartige Ingangsetzen des jeweiligen Öffnens des Schalters 15 bzw.

10

16. Die einzelnen Stromimpulse der Zeile D' führen jeweils zunächst zu einem Anstieg auf wenigstens die Sprungtemperatur  $T_c$ . Dieses führt zu dem oben erwähnten Auftreten des

15

Ohm'schen Reststromes mit seiner dann diesen Zustand selbststabilisierenden Joule'schen Wärme für den weiterhin sperrenden Zustand des jeweiligen Schalters. Insbesondere aus den Zeilen A und D ist die Bedeutung des zwischen zwei aufeinanderfolgenden zeitlichen Magnetflussänderungen gemäß Zeile A vorgesehenen Zeitintervalles  $\tau$  mit wenigstens angenähert konstantem Magnetfluss  $\phi$  zu ersehen. In diesem Zeitintervall

20

liegt an beiden Sekundärspulen des Transformators praktisch keine elektrische Spannung an und damit ist in diesen - auch bei geschlossenem jeweiligem Schalter 15, 16 - kein induktiv erregter Stromfluss vorhanden. Dies führt zu dem oben beschriebenen zeitlichen Abbruch bzw. Abreißen des durch den

25

geöffneten Schalter fließenden Reststromes und damit des selbststabilisierenden Effekts, durch den der jeweilige Schalter 15, 16 wieder in supraleitenden Zustand des Dünnsfilms 41 zurückkehren, d.h. seine Temperatur auf die Temperatur  $T_0$  zurückfallen kann, wie dies die Zeile D zeigt.

30

Mit der Erfindung erreicht man minimale Wärmeabgabe beim Schalten, ohne die Pulsfrequenz des Nachladens unzulässig verringern zu müssen.

35

Die Zeile E zeigt den Primärstrom im und Zeile F die Primärspannung am Transformator 13 bzw. der Primärspule 113 des Transformators 13..

Die rechte Seite der Figur 5, die die zeitliche Stabilisierung der Magnetfeldstärke des Elektromagneten 111 betrifft, unterscheidet sich vom Aufladevorgang der linken Hälfte der Figur 5 darin, dass die Vorzeichenwechsel des Primärstromes bzw. des magnetischen Flusses im Transformator 13 zeitlich gestreckt vorgesehen sind, nämlich so, wie das Wiederaufladen erforderlich ist, wie dies aus der Zeile C, rechte Hälfte, zu ersehen ist.

10

Das Aufladen des Elektromagneten 111 bzw. das Nachladen desselben für zeitliche Konstanz seines Magnetfeldes erfolgt nach Figur 5 hier durch Einstellen der Impulsfrequenz und/oder der Impulsamplitude und entsprechende Steuerung der Schalter der Gleichrichterschaltung der Flusspumpe. Die Pulsfrequenz kann vorzugsweise durch bzw. mit einem Regelkreis vorgegeben werden.

15

Der Regelkreis umfaßt z.B. Maßnahmen zur periodischen NMR-Feldmessung im bzw. am Magneten. Festgestellt wird z.B. die Differenz zwischen Ist- und Soll-Wert der NMR-Frequenz. Die auftretende Differenz wird wieder ausgeglichen durch entsprechend proportionale Änderung der Pulsfrequenz, mit der die Flusspumpe am Eingang, d.h. an der Primärspule 113 des Transformators 13 angesteuert wird.

25

Als alternative Maßnahme zum Erreichen einer Feldstabilisierung kann im Bereich, in dem die erforderliche Tieftemperatur herrscht, diese Abweichung auch durch eine Strommessung oder mit einem Hall-Sensor ermittelt werden und wiederum in korrigierte Pulsfrequenz umgesetzt werden.

30

Entsprechend den dargelegten Vorgängen der Figur 5 kann ein einmal aufgeladener Elektromagnet 111 in sinngemäß reversibler Weise mittels der Flusspumpe, diese also in umgekehrter Richtung arbeitend, wieder entladen werden. Hierbei wird bei

35



gleichem Pulsschema jeweils der Schalter geöffnet, der beim Aufladen geschlossen ist und umgekehrt.

- Erfindungsgemäß ist vorgesehen, Flusspumpe 2 und Magnet 111 vorteilhafterweise zusammen in einem gemeinsamen Kryostaten anzuordnen. Die Temperatur in diesem Kryostaten kann auf die für den Elektromagneten 111 vorgesehenen Temperaturwert, z.B. den oben genannten Wert  $T_0$  eingestellt werden, nämlich so bemessen, dass das  $HT_c$ -Supraleiter-Material der Spule 11 des Magneten die erforderliche Stromtragfähigkeit im erzeugten Magnetfeld hat. Es kann dann vorgesehen sein, dass die Grundplatte 45 der Schalteranordnung auch auf einer höheren Temperatur, diese jedoch unterhalb der Temperatur  $T_c$  des Supraleiter-Materials, gehalten werden. Davon abhängig ist die erforderliche Heizleistung des Heizers 48 des Schalters (Figur 4) und die Bemessung des Wärmeübergangsvermögens vom Dünnsfilm 41 zur Grundplatte 45.

## Patentansprüche

1. Vorrichtung mit einer Supraleiter-Flusspumpe (2) mit einem Transformator (13) mit sekundärseitig wenigstens einer supraleitenden Spule (213, 313) in der sekundärseitigen Gleichrichterschaltung mit wenigstens einem steuerbaren (25) Schalter (15, 16; 115, 116), diese Pumpe vorgesehen zur Stromeinspeisung (21, 22) in eine supraleitende Spule (11) eines Elektromagneten (111), *d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t*, dass die jeweilige sekundärseitige Spule (213, 313) des Transformators (13) aus einem HT<sub>c</sub>-Supraleitermaterial besteht und als jeweiliger Schalter (15, 16; 115, 116) ein solcher vorgesehen ist, dessen Schalterstrecke (146) als Streifen aus ebenfalls einem HT<sub>c</sub>-Supraleitermaterial ausgeführt ist, wobei zu dieser Schalterstrecke (146) in wärmeleitendem Kontakt benachbart ein steuerbar (25) zu betreibender Heizer (48) angeordnet ist.
2. Vorrichtung nach Anspruch 1, *d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t*, dass die Flusspumpe (2) und die supraleitende Spule (11) des Elektromagneten (111) zusammen in einem gemeinsamen Kryostaten (100) angeordnet sind.
3. Vorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, *d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t*, dass die Schalterstrecke (146) als Dünnsfilm (41) ausgebildet ist.
4. Vorrichtung nach Anspruch 3, *d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t*, dass der Dünnsfilm (41) im Bereich der Schalterstrecke (146) 0,2 bis 2 µm dick bemessen ist.
5. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 3 oder 4, *d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t*, dass die Stromtragfähigkeit des Querschnitts des Dünnsfilms (41) im Bereich der Schalterstrecke (146) auf mindestens 10<sup>6</sup> A/cm<sup>2</sup> bemessen ist.

6. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 5, da -  
durch gekennzeichnet, dass für den Schal-  
ter (15, 16) als HT<sub>c</sub>-Supraleitermaterial ein solches der  
Gruppe RE BaCuO ausgewählt ist mit RE als wenigstens einem  
5 Seltenerdmetall Nd, La, Dd, Eu, Sm oder Yttrium.

7. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 4, da -  
durch gekennzeichnet, dass als Material  
für den Schalter (15, 16) Bi2212 oder Bi2223 oder LaSr-CuO  
10 ausgewählt ist.

8. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 3 bis 7, da -  
durch gekennzeichnet, dass der Dünnfilm  
(41) auf einer Pufferschicht (42') für Texturierung des Dünn-  
15 films aufgebracht ist.

9. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 3 bis 8, da -  
durch gekennzeichnet, dass als Substrat  
(42) für den Dünnfilm (41) polykristallines ZrO, MgO oder  
20 Glas vorgesehen ist.

10. Vorrichtung nach Anspruch 9, da durch ge -  
kennzeichnet, dass die Dicke des Substrats (42)  
des Dünnfilms (41) 0,05 bis 0,1 mm bemessen ist.

25 11. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 10, da -  
durch gekennzeichnet, dass die Schalter  
(15, 16; 115, 116) auf einer Grundplatte (45) aus gut wärme-  
leitendem Material aufgebaut sind.

30 12. Vorrichtung nach Anspruch 11, da durch ge -  
kennzeichnet, dass die Grundplatte (45) aus Kup-  
fer besteht.

35 13. Vorrichtung nach Anspruch 11 oder 12, da durch  
gekennzeichnet, dass die Oberfläche der Grund-  
platte (45) wenigstens im Bereich der Schalterstrecke (146)

mit einem Belag mit einer Dicke und aus einem Material bestehend versehen ist, so dass dieser Belag (46) ein vorgebbares Wärmeleitvermögen zwischen der Grundplatte (45) und dem Dünnsfilm (41) aufweist.

5

14. Vorrichtung nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, dass für den Belag (46) ein Kunststoffmaterial verwendet ist.

10

15. Vorrichtung nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, dass als ein solcher Belag (46) ein Fett vorgesehen ist.

15

16. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 15, dadurch gekennzeichnet, dass die Materialien und Bemessungen der für einen jeweiligen Schalter (15, 16; 115, 116) verwendeten Materialien gegeneinander so abgewogen sind, dass im gesteuerten Zustand der Sperrung des Stromflusses in der Schalterstrecke (146) ein selbst stabilisierter Zustand dieser Sperrung eintritt.

20

17. Verfahren zum Betrieb einer Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 16, dadurch gekennzeichnet, dass die Speisung des Transformators (13) der Flusspumpe (2) mit Stromimpulsen erfolgt (Figur 5, Zeile E).

25

18. Verfahren zum Betrieb einer Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 16 und/oder nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, dass der Heizer (48) des jeweiligen Schalters (15, 16; 115, 116) zum jeweiligen Öffnen des Schalters zunächst mit einem zur Zeitdauer dieser Schalterphase vergleichsweise zeitlich kurzen Heizimpuls für nachfolgend selbststabilisierten Schalterzustand angesteuert wird und dieser Zustand erst durch gesteuertes Absenken des Reststromes beendet wird. (Figur 5, Zeile D')

35

19. Verfahren nach Anspruch 18, d a d u r c h g e -  
k e n n z e i c h n e t, dass das jeweilige Absenken des  
Reststromes durch ein jeweiliges Zeitintervall ( $\tau$ ) in der  
Speisung des Transformators (13) bewirkt wird, wobei inner-  
5 halb dieses Zeitintervalls ( $\tau$ ) der Magnetfluss ( $\phi$ ) im Trans-  
formator wenigstens angenähert konstant ( $d\phi/d\tau \approx 0$ ) gehalten  
wird. (Figur 5, Zeile A)

20. Verfahren nach einem der Ansprüche 17 bis 19, d a -  
10 d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass die Stromsta-  
bilisierung im Elektromagneten (111) durch Regelung (413) der  
Speisung des Transformators (13) der Flusspumpe (2) ausge-  
führt wird.

21. Verfahren nach Anspruch 20, d a d u r c h g e -  
15 k e n n z e i c h n e t, dass die Regelung durch geregelte  
Frequenz der Impulsfolge der Speisung des Transformators (13)  
erfolgt.

22. Verfahren nach Anspruch 20, d a d u r c h g e -  
20 k e n n z e i c h n e t, dass die Regelung durch geregelte  
Amplitude der Impulse der Speisung des Transformators (13)  
erfolgt.

## Zusammenfassung

Flusspumpe mit Hochtemperatursupraleiter und damit zu betreibender supraleitender Elektromagnet

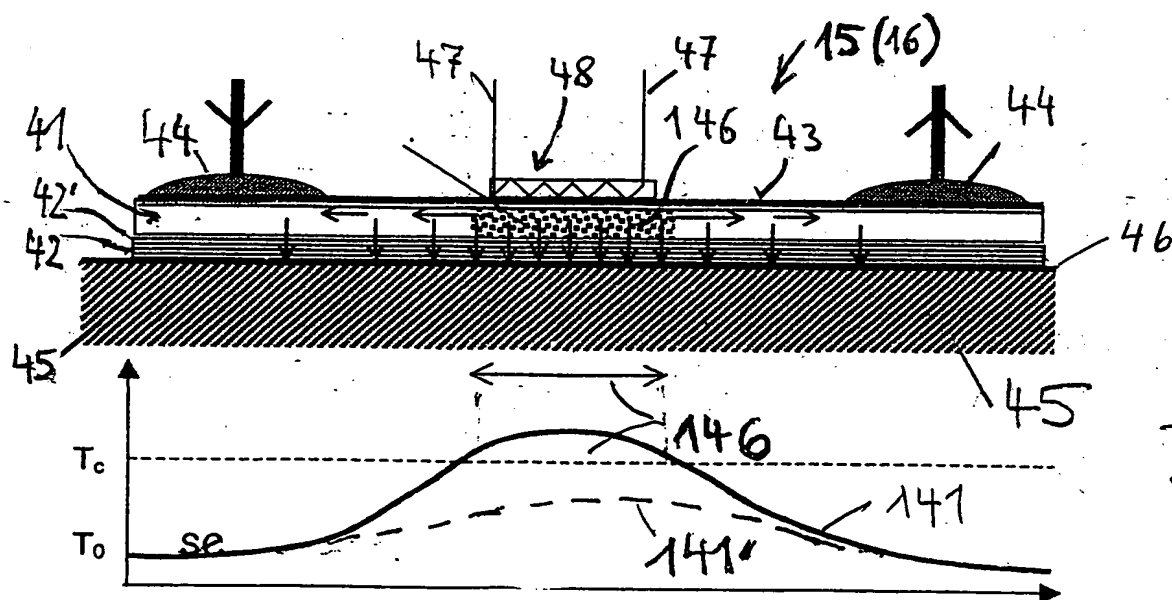
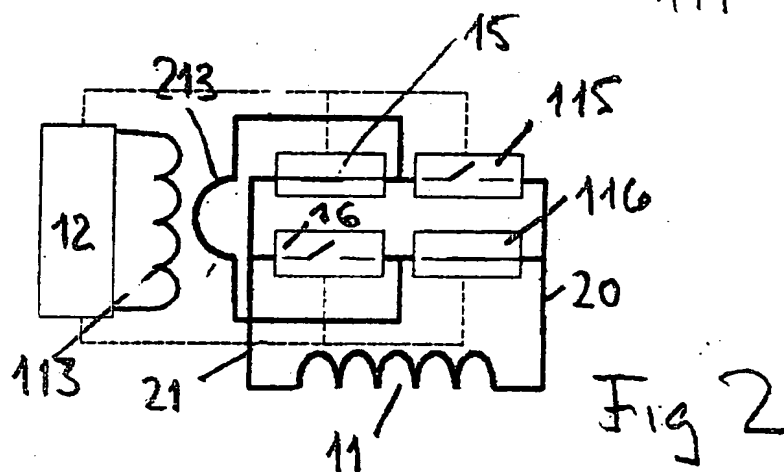
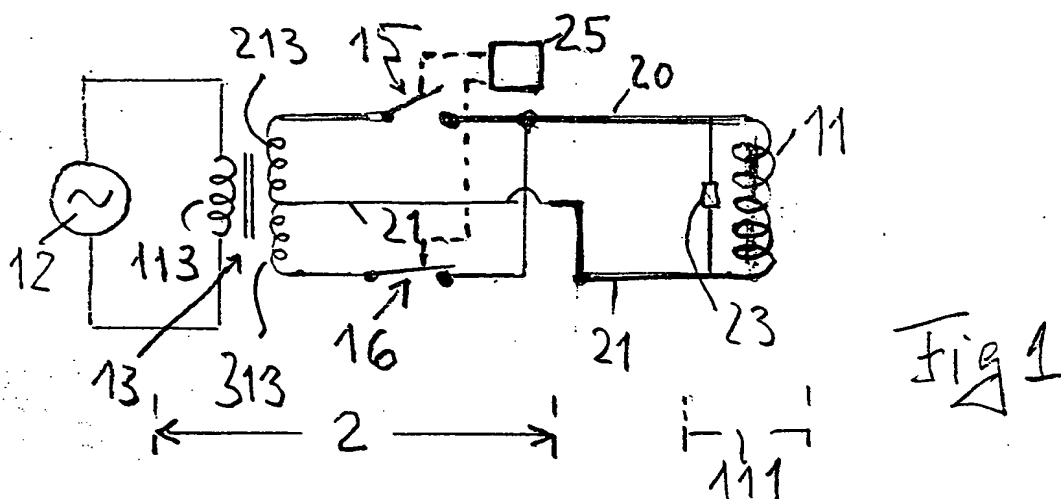
5

Flusspumpe (2) des Gleichrichtertyps mit Hochtemperatur-Supraleiter mit Schaltern (15, 16, 115, 116), die mittels eines Heizers (48), insbesondere mit Triggerimpulsen D' und Selbststabilisierung im Gleichrichtertakt zu steuern (25)

10

sind. Anordnung von Flusspumpe (2) und mit dieser zu speisender supraleitender Elektromagnet (111) in einem gemeinsamen Kryostaten (100)-Gehäuse.

FIG 4



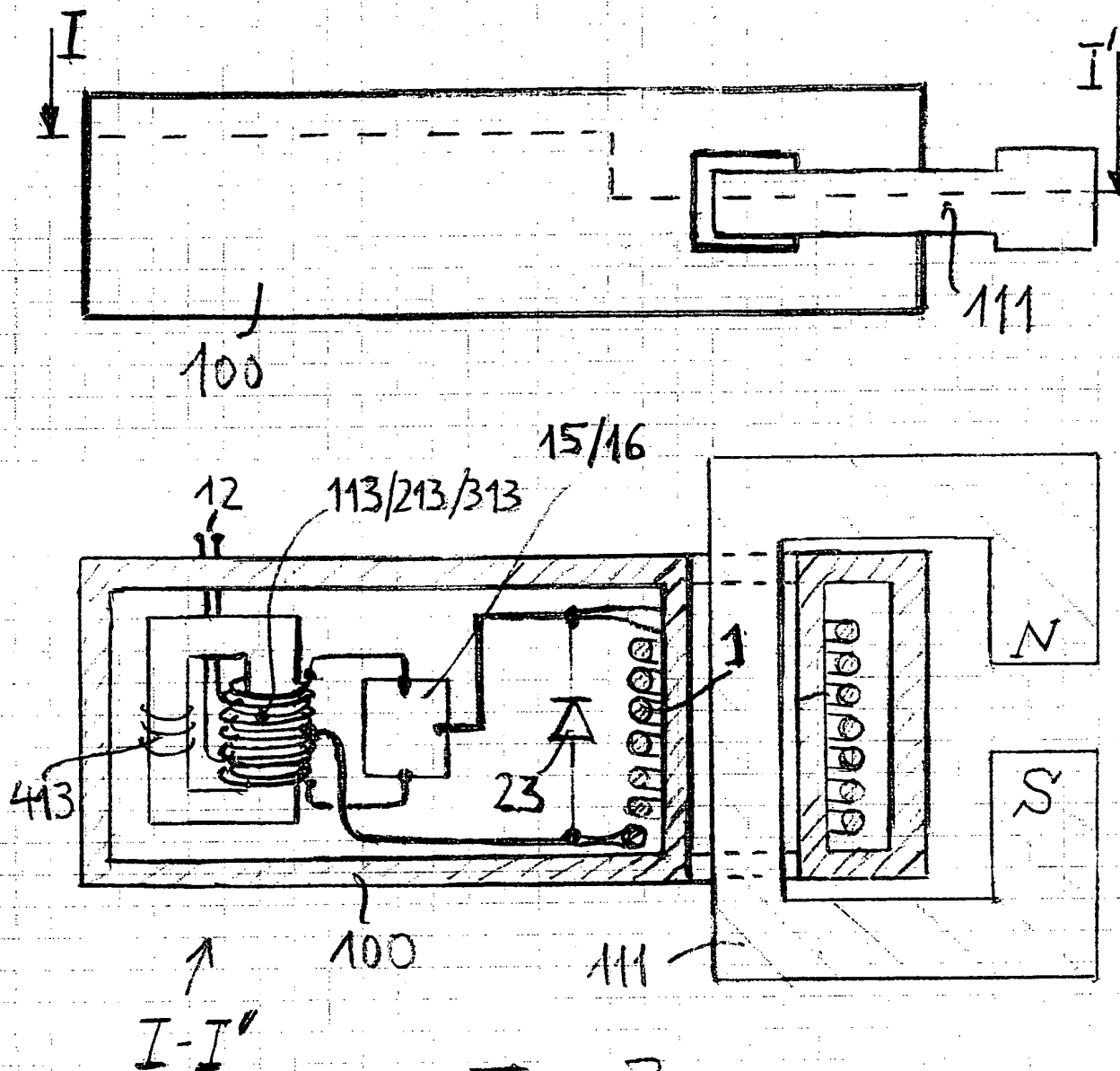


Fig 3



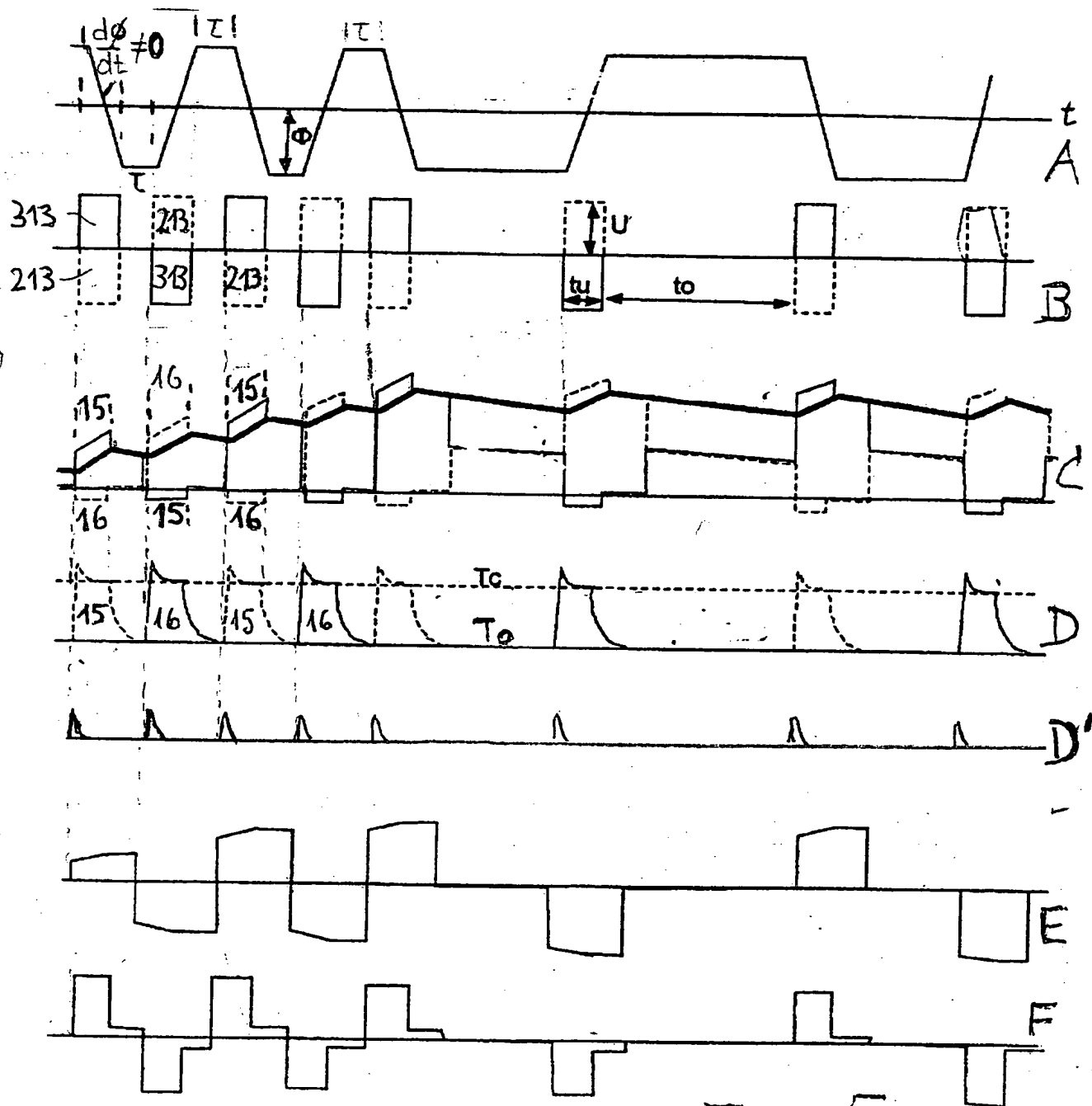


Fig 5